

10. Blackwelder R. F. Some notes on drag reduction in the near-wall region. *Lecture Notes in Physics*. Springer, 1998, vol. 54, pp. 155–198.
11. Isaev S., Voropaev G., Grinchenko V., Sudakov A., Voskoboinick V., Rozumnyuk N. Drag reduction of lifting surfaces at the use of oval dimples as vortex generators. *Abstract of the European Drag Reduction and Flow Control Meeting "EDRFCM 2010"*. Kyiv, Ukraine, 2010. pp. 32–33.
12. Voskoboinick V., Kornev N., Turnow J. Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements. *Flow Turbulence Combust.* 2013, vol. 90, no. 4, pp. 709–722.
13. Bendat J., Pirsol A. *Prikladnyy analiz sluchaynykh dannykh* [Applied analysis of random data]. Moscow, Mir Publ., 1989. 540 p.
14. Voskoboinick V., Voskoboinick A., Stepanovitch V. Generation of vortex structures by pair oval dimples on flat plate. *Proc. European Drag Reduction and Flow Control Meeting – EDRFCM 2015, March 23–26, 2015*. Cambridge, UK, 2015, pp. 43–44.
15. Voskoboinick V. A., Turick V. N., Voskoboiny O. A., Voskoboinick A. V., Tereshchenko I. A. Influence of the deep spherical dimple on the pressure field under the turbulent boundary layer. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEE 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham., 2019, vol 754, pp. 23–32.

Поступила (received) 26.03.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Воскобійник Володимир Анатолійович (Воскобойник Владимир Анатольевич, Voskoboinick Vladimir Anatolievich) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: vlad.vsk@gmail.com.

Воскобойник Олександр Анатолійович (Воскобойник Александр Анатольевич, Voskoboinick Oleksandr Anatoliyovych) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: alexandr.vsk@gmail.com.

Турік Володимир Миколайович (Турик Владимир Николаевич, Turick Vladimir Nikolaevich) – кандидат технічних наук, доцент, професор НТУУ Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, професор кафедри, м. Київ; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: turick46@gmail.com.

Воскобійник Андрій Володимирович (Воскобойник Андрей Владимирович, Voskoboinick Andrew Vladimirovich) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 371-65-57; e-mail: andrew.vsk@gmail.com.

УДК 532.5

А. А. ГУРЖИЙ, О. И. КОРДАС, Е. И. НИКИФОРОВИЧ, Д. И. ЧЕРНИЙ

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИ СОСТАВЛЕНИИ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рассматривается задача о двухмерной адвекции поверхностного загрязнения морскими течениями со сложной геометрией береговой линии в приближении идеальной несжимаемой жидкости. Задача решена с использованием численного метода дискретных особенностей, адаптированного к задачам адвекции жидкости. Обсуждается иллюстрационный пример эволюции загрязнения в Днепровско – Бугском лимане. Показано, что действие ветра приводит к значительным изменениям в движении загрязнения, к заметному замедлению скорости движения загрязнения и его смещению в поперечном направлении по отношению к основному потоку.

Ключевые слова: задача адвекции, 2D потенциальное течение, метод дискретных особенностей, поверхностное загрязнение.

О. А. ГУРЖИЙ, О. І. КОРДАС, Є. І. НІКІФОРОВИЧ, Д. І. ЧЕРНИЙ

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ДИСКРЕТНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПРИ СКЛАДАННІ КОРОТКОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУ ПОШИРЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ НА МОРСЬКІЙ ПОВЕРХНІ

Розглядається задача про двовірну адвекцію поверхневого забруднення морськими течіями зі складною геометрією берегової лінії в наближенні ідеальної нестисливої рідини. Задача розв'язана з використанням чисельного методу дискретних особливостей, адаптованого до задач адвекції рідини. Обговорюється ілюстративний приклад еволюції забруднення в Дніпровсько – Бугському лимані. Показано, що дія вітру призводить до значних змін в русі забруднення, до помітного уповільнення швидкості руху забруднення і його зміщення в поперечному напрямку по відношенню до основного потоку.

Ключові слова: задача адвекції, 2D потенційна течія, метод дискретних особливостей, поверхневе забруднення.

A. A. GOURJI, O. I. KORDAS, E. I. NIKIFOROVICH, D. I. CHERNIY

APPLICATION OF THE METHOD OF DISCRETE SINGULARITIES IN SHORT-TERM FORECASTING OF POLLUTION PROPAGATION ON THE SEA SURFACE

The paper deals with the two-dimensional advection problem of surface pollution by sea currents with complex coastline geometry in the approximation of an ideal incompressible fluid. The problem was solved using the numerical method of discrete singularities adapted to the advection problems of fluids. An illustrative example of the evolution of pollution in the Dnieper – Bug estuary is discussed in the report. It is shown that the effect of the wind leads to significant changes in the movement of pollution, to a noticeable slowing of the pollution movement, and its displacement in the transverse direction with respect to the main flow.

Key words: advection problem, 2D potential flow, method of discrete singularities, surface pollution.

© А. А. Гуржий, О. И. Кордас, Е. И. Никифорович, Д. И. Черний, 2019

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях, № 8 (1333) 2019.

Введение. В условиях нарастающей опасности техногенных катастроф одной из важных задач экологической безопасности государства является мониторинг и поддержание экологической системы [1]. Человеческий фактор, а в некоторых случаях и неблагоприятные погодные условия, приводят к существенному повышению рисков аварий на транспорте, которые могут сопровождаться загрязнением окружающей среды. Для поддержания экологической системы во многих странах мира сегодня сформированы центры мониторинга и контроля экологической обстановки на море, в задачу которых входят выработка решений по локализации и действий по ликвидации последствий аварий в шельфовой зоне морей [1, 2].

Анализ последних исследований. Сегодня в мире существует много центров по ликвидации последствий экологических аварий, которые используют различные моделирующие системы. Для составления прогноза распространения поверхностного загрязнения такие системы включают в себя мониторинговые системы параметров ветра и течений, химические и физические параметры морской среды [3]. Эти данные через спутниковую связь передаются в национальные вычислительные центры для составления прогноза. Некоторые подробности моделирующих систем, созданные за последние десятилетия, можно найти в работе [4].

Распространение загрязнений по морской поверхности представляет собой сложное явление, которое включает различные физические и химические процессы, которые вызваны морскими течениями, приливами и дрейфом под действием ветра, диффузией частиц загрязнений, механическим растеканием углеводородов, испарением и оседанием различным компонент нефти, эмульгированием и испарением [5]. Учет этих эффектов значительно улучшает качество прогноза и открывает определенные возможности составления долгосрочных прогнозов распространения поверхностных загрязнений на водной поверхности. В этом случае необходимо проводить объемные вычисления с использованием различных комбинированных методов, опираясь на широкую базу имеющейся и текущей информации [4].

Экологическая безопасность на планете зависит не только от экологической обстановки передовых стран, но и от экологических условий в странах, в которых разработка, приобретение или кооперация в использовании комплексных моделирующих систем встречает ряд трудностей, в первую очередь по финансовым причинам. Поэтому возникает острая необходимость создания простых, мобильных систем краткосрочного прогнозирования распространения загрязнений в прибрежной зоне таких стран, которые могут формировать краткосрочные прогнозы на персональных компьютерах умеренной производительности для заинтересованных национальных служб. Основным требованием к таким прикладным системам является доступность исходной информации, достоверность прогнозирования и умеренный объем вычислений, который может быть реализован в режиме, опережающим реальное время.

Постановка задачи. Основной задачей моделирующей системы для составления краткосрочного прогноза является расчет эволюции распространения поверхностного загрязнения в рассматриваемой акватории для принятия службами береговой охраны последовательности действий по локализации и ликвидации последствий экологической аварии. Точность составления прогноза должна быть в пределах визуального и локационного мониторинга на судах специального назначения.

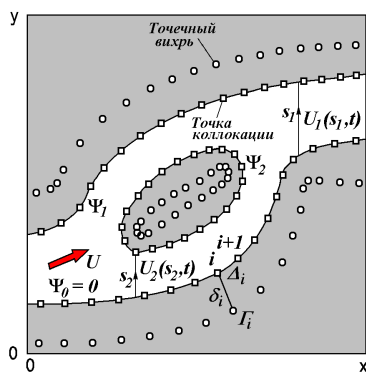


Рис. 1 – Пример геометрии задачи.

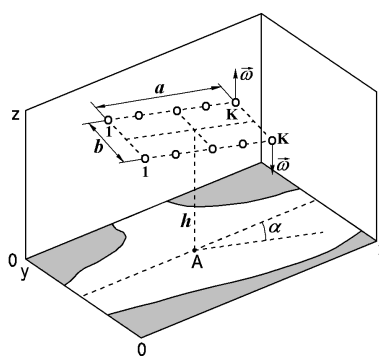


Рис. 2 – Система вихревых вихрей над расчетной областью.



Рис. 3 – Схема Днепровско – Бугского Лимана.

Целью настоящих исследований является формирование математической модели процесса переноса выделенной жидкости поверхностными течениями на водной поверхности с учетом сложной геометрии береговой линии, влияния силы и направления ветра. Необходимо выявить основные свойства и закономерности процесса переноса поверхностного загрязнения в акватории дельты речных систем.

Математическая модель. Анализ литературных данных [3, 6, 7] показывает, что в течение первых нескольких дней химические взаимодействия большинства видов загрязнений с водной средой не приводят к появлению существенного смещения в локации загрязнения. Поэтому, при составлении математической модели процесса распространения загрязнения химические превращения можно не учитывать. В этом случае можно

считать [8], что определяющими факторами в процессе переноса поверхностного загрязнения являются *нелинейный конвективный перенос и ветровая нагрузка*. Анализ масштабов физических процессов [7, 8] показывает, что такое допущение оказывается оправданным только на малых временных интервалах в масштабах рассматриваемых задач, в течение которых диффузионные эффекты еще не успели проявить свое заметное влияние.

Условие равенства скорости движения отдельной пассивной жидкой частицы скорости течения в точке, в которой она расположена, приводит к уравнению движения:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{U}(\mathbf{x}, t). \quad (1)$$

При этом *нелинейность движения жидкости* сосредоточена в правой части уравнения, описывающего движение *лагранжевой жидкой частицы* в *эйлеровом поле скорости*. Это уравнение позволяет начально-краевую задачу переноса выделенной жидкости поверхностным течением свести к решению двух отдельных задач: двухмерной гидродинамической задачи течения жидкости в расчетной области и задачи переноса системы выделенных частиц в рассматриваемом течении. Определение правой части уравнения (1) представляет собой отдельную, независимую гидродинамическую задачу. Во многих случаях именно эта задача связана с большими объемами вычислений и требует наибольших вычислительных ресурсов.

Для решения гидродинамической задачи в модели применен метод дискретных особенностей [9]. Основная идея метода связана с аналогией, которая существует между потенциальным и циркуляционным движением идеальной несжимаемой жидкости. Введение в систему определенных граничных условий на безграничной плоскости вдоль произвольной линии, совпадающей с границей течения, приводит к системе интегральных сингулярных уравнений. Это эквивалентно введению в численную схему решения гидродинамической задачи системы точечных вихрей [10, 11], интенсивность которых определяется граничными условиями.

Рассмотрим двухмерное потенциальное движение идеальной несжимаемой жидкости внутри канала, ограниченного непроницаемыми границами сложной геометрии (рис. 1). Метод дискретных особенностей, адаптированный к задачам адвекции [10], позволяет определить распределение функции тока $\Psi(x, y, t)$ течения для заданной геометрии канала и профиля скорости $U_i(s_i, t)$ течения (где s_i – линия, соединяющая границы течения). Необходимо определить распределение двухмерного поля скорости $U[U(x, y, t), V(x, y, t)]$ поверхностного течения жидкости.

Гидродинамическая задача решается в терминах функции тока $\Psi(x, y, t)$. Поскольку линия тока постоянного значения представляет собой кривую, вдоль которой нормальная компонента скорости равна нулю, то граничные условия на ограничивающих поверхностях канала можно записать в виде равенства значений функции тока на границе течения.

Для пространственной фиксации линии тока, совпадающей с границей канала, метод дискретных особенностей предусматривает введение в расчетную схему системы *точек коллокаций* и *фиксированных точечных вихрей* (рис. 1). Точки коллокаций располагаются вдоль границ на некотором расстоянии Δ_i ($i = 1, \dots, N$, где N – общее число точек коллокаций в рассматриваемой системе) друг относительно друга, которое определяет точность дискретизации границ канала.

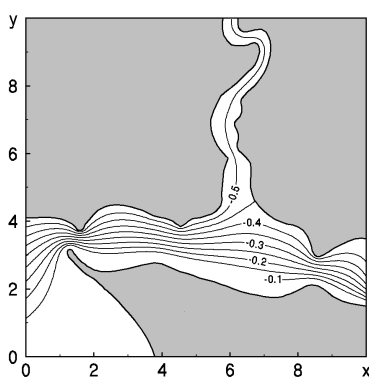


Рис. 4 – Распределение функции тока в Днепроовско – Бугском лимане при отсутствии ветра.

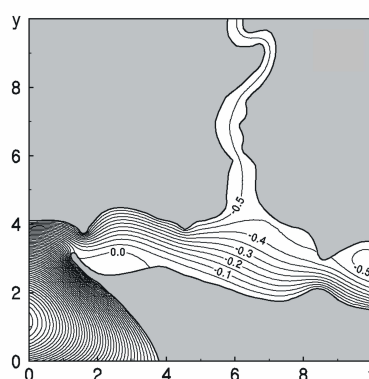
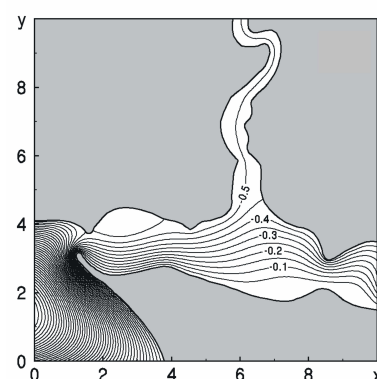


Рис. 5 – Распределение функции тока умеренного ветра в Днепроовско – Бугском лимане при: а – $\alpha = 90^\circ$ (северный ветер); б – $\alpha = 270^\circ$ (южный ветер).



Значения функции тока и проекции поля скорости, наведенные системой N точечных вихрей с интенсивностями Γ_i , расположенными в точках с координатами (x_i, y_i) , определяются выражением [12]:

$$\Psi(x, y) = -\frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^N \Gamma_i \ln \left[(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 \right], \quad U(x, y) = \frac{\partial \Psi}{\partial y}, \quad V(x, y) = -\frac{\partial \Psi}{\partial x}, \quad (2)$$

которое представляет собой сумму вкладов каждого точечного вихря в рассматриваемую точку течения.

Условие равенства значений функции тока в точках коллокаций на каждой границе рассматриваемого течения позволяет сформировать систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных интенсивностей Γ_i системы фиксированных точечных вихрей:

$$\sum_{i=1}^N \Gamma_i \ln \left[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \right] = -4\pi\Psi(x_j, y_j), \quad j = 1, \dots, N. \quad (3)$$

Метод дискретных особенностей решения гидродинамической задачи позволяет принять во внимание вклад ветровой компоненты скорости на поверхности течения. Для этого над расчетной областью, над некоторой базовой точкой A можно разместить систему вихревых элементов (рис. 2). Она состоит из K вихревых элементов одинаковой интенсивности Γ в глубине рисунка и слоя вихревых элементов с интенсивностью $-\Gamma$ в передней части рисунка. Интенсивность вихревых элементов будет определять величину модуля скорости поверхностного течения, наведенного ветром, а α – угол между осью системы вихревых элементов и направлением оси Ox . Некоторые подробности можно найти в [11].

Поставленную математическую задачу удобно обезразмерить на L_0 – характерный геометрический масштаб задачи и T_0 – характерный временной масштаб. В этом случае безразмерные величины задачи принимают следующие значения:

$$(x^*, y^*, z^*) = \frac{(x, y, z)}{L_0}, \quad t^* = \frac{t}{T_0}, \quad (U^*, V^*) = \frac{(U, V)}{L_0} T_0, \quad (\Gamma^*, \Psi^*) = \frac{(\Gamma, \Psi)}{L_0^2} T_0. \quad (4)$$

В дальнейшем звездочки при обезразмеренных величинах будут опущены. Поставленная математическая задача будет решена в безразмерном виде.

Результаты численного моделирования. В качестве примера составления прогноза рассмотрим возможный случай выброса поверхностного загрязнения в Днепро-Бугском лимане. Схема залива показана на рис. 3, который выполнен в масштабе $L_0 = 5.0$ км. В качестве временного масштаба выбираем значение $T_0 = 1.0$ час.

Река Днепр представляет собой одну из полноводных рек восточной Европы со среднегодовым расходом $1700 \text{ м}^3/\text{с}$ в устье реки [13]. Средняя скорость течения в устье реки составляет $0.6 \dots 0.7$ м/с при ширине устья порядка $4.0 \dots 5.0$ км. Река Южный Буг – одна из больших рек Украины со средним расходом воды порядка $160 \text{ м}^3/\text{с}$ в устье со средней скоростью течения $0.4 \dots 0.5$ м/с. Днепро-Бугский лиман представляет собой водоем длиной порядка $35 \dots 40$ км и шириной порядка $5 \dots 10$ км. В восточную часть лимана впадает р. Днепр (в южную часть лимана, со стороны Крымского полуострова), а в среднюю часть (со стороны континентальной Украины) впадает р. Южный Буг. Выход Днепро-Бугского лимана в Черное море представляет собой узкий пролив, образованный выступом (со стороны г. Очаков) и Кинбурнской косой (со стороны полуострова Крым).

Распределение функции тока в Днепро-Бугском лимане в штиль (при отсутствии ветра) показано на рис. 4, на котором нанесено семейство линий тока с эквидистантным шагом $\Delta\Psi = 0.05$. Видно, что интенсивный водный поток р. Днепр занимает южную часть лимана, а воды р. Южный Буг протекают в северной его части. Течение внутри Днепро-Бугского лимана обладает сепаратриссой, разделяющей водные потоки рек. Поскольку жидкость при стационарном течении не пересекает линии тока, сепаратрисса показывает в какую область лимана может занять загрязнение, попавшее в начальный момент в воды р. Днепр или р. Южный Буг.

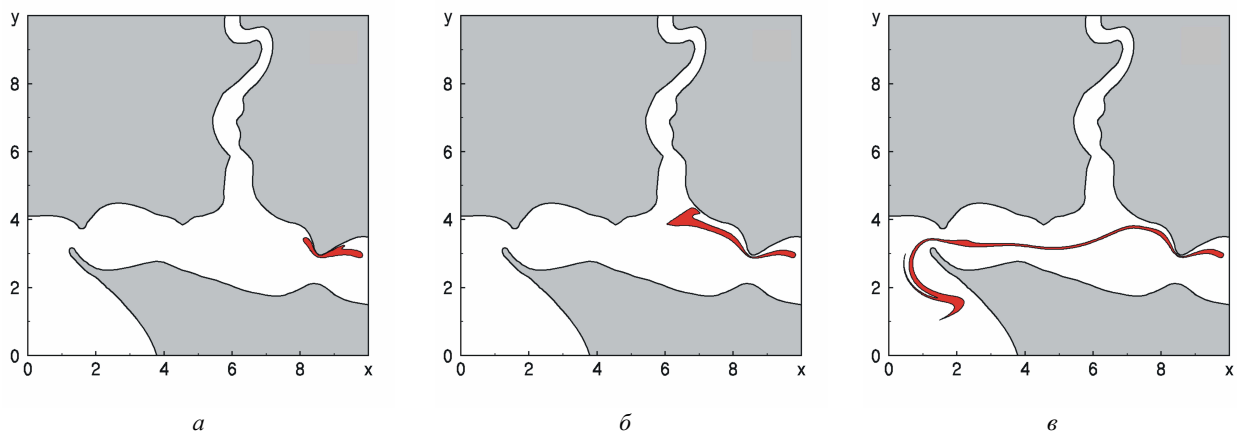


Рис. 6 – Распространение поверхностного загрязнения в Днепро-Бугском лимане под действием ветра:

$a - t = 6$; $b - t = 20$; $v - t = 50$.

Наличие ветра меняет структуру поверхностного течения в Днепро-Бугском лимане. На рис. 5, выполненном в аналогичном стиле с рис. 4, показано распределение поля функции тока при ветре силой

$U_B = 15.0$ м/с в (4 балла по шкале Бофорта). В случае северного ветра $\alpha = 90^\circ$ сепаратрисса, разделяющая воды р. Днепр и р. Южный Буг, смещается в сторону устья р. Днепр (рис. 5, а). Интересно отметить, что северный ветер способствует образованию циркуляционных зон. Например, в устье р. Днепр действие сильного течения (вдоль крымского побережья) и северного ветра сформировали циркуляционную зону, в которой жидкость движется по замкнутым траекториям. Характерной особенностью этого течения является существенно низкие скорости поверхностного течения по сравнению со скоростью течения р. Днепр. Второй отличительной особенностью поверхностного течения в Днепровско – Бугском лимане является образование циркуляционной зоны на восточном побережье Кинбурнской косы. Исследования показывают, что образование этой циркуляционной зоны течения вызвано не только влиянием ветра, но и геометрией косы.

Анализ численных результатов показывает, что действие южного ветра ($\alpha = 270^\circ$) умеренной силы приводит к общему смещению вод р. Днепр в северном направлении (рис. 5, б). При этом сепаратрисса, разделяющая воды рек, не смещается далеко против течения р. Южный Буг по сравнению со случаем на рис. 5, а. Геометрия береговой линии Днепровско – Бугского лимана около г. Очаков приводит к формированию достаточно большой циркуляционной зоны вдоль побережья континентальной Украины.

Теперь рассмотрим процесс распространения поверхностного загрязнения в акватории Днепровско – Бугского лимана. Пусть в начальный момент загрязнение поступает на водную поверхность в точке ($x_c = 9.75$, $y_c = 2.95$), занимает круг радиуса $R_c = 0.2$ и поступает с постоянной скоростью. Предположим, что прогноз и направление силы ветра имеют динамику, характерную при прохождении атмосферного циклона. В начальный момент времени дул северный ветер умеренной силы. По истечении 10 часов ветер сменил направление на западный, а сила ветра уменьшилась до слабого. Пусть в дальнейшем сила ветра снова увеличивается до умеренных значений, а направление ветра меняется на южный. Предположим, что на финальном временном отрезке сила ветра остается в пределах умеренного, а направление ветра снова меняется на западный.

Поскольку в начальный момент времени имел место умеренный северный ветер, пятно загрязнения попало в циркуляционную зону (рис. 5, а) и стало смещаться в сторону левого берега р. Днепр. Пятно, под действием основного течения движется вдоль правобережного выступа в дельте р. Днепр. Рис. 6, а иллюстрирует положение загрязнения под действием уменьшающегося по силе ветра и постепенной смене направления на западный.

На рис. 6, б показано положение загрязнения в момент времени $t = 20.0$, при котором передняя часть области загрязнения начала свое движение вдоль сепаратриссы. Отметим, что большая часть загрязнения по-прежнему находится около левой береговой линии р. Днепр, в северо-восточной части лимана. В дальнейшем сила ветра достигает значений, соответствующих умеренному ветру, а направление ветра меняется на северное. В этом случае, в устье Днепровско – Бугского лимана, около побережья континентальной Украины, начинает формироваться циркуляционная зона рис. 5, б, которая смещает основной водный поток лимана в сторону Крымского полуострова. Такое смещение отражается на распределении загрязнения на водной поверхности. На рис. 6, в показано положение выделенной жидкости в момент $t = 50.0$. Видно, что ветровая нагрузка способна смещать поверхностное загрязнение на большие расстояния в масштабах Днепровско – Бугского лимана. Отметим, что хвостовая часть загрязнения, расположенная около входа в лиман со стороны р. Днепр, тоже смещается в южном направлении под действием ветра. Загрязнение охватило большую часть поверхности Днепровско – Бугского лимана, начиная от левого берега устья р. Днепр до вод, прилегающих к Кинбурнской косе полуострова Крым.

Перспективы дальнейших исследований. Авторы считают перспективными проведение адаптации математической модели распространения поверхностного загрязнения на случай открытых плоских течений в поле скорости крупномасштабных вихревых структур и в течениях, которые развиваются в шельфовой зоне мирового океана.

Выводы. В работе рассмотрена задача о двухмерной адвекции пассивной примеси поверхностными течениями в устьях речных системах со сложной геометрией береговой линии и с учетом ветровой нагрузки. Численное решение задачи основано на методе дискретных особенностей, адаптированном к задачам адвекции жидкости. Составление краткосрочного прогноза начинается с оцифровки береговой линии. Условие стационарности и непротекания жидкости через береговые линии расчетной области требует выполнения условия равенства значений функции тока в точках коллокации, принадлежащих каждой береговой линии в рассматриваемом течении.

В рассматриваемой модели движение отдельной жидкой частицы (маркер) описывается в лагранжевом представлении системой обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка (задача Коши) с соответствующими начальными условиями. Система маркеров, расставленная в начальный момент на границе загрязнения, позволяет описать эволюцию границы с течением времени на расчетной области.

Исследования показали, что сложная геометрия Днепровско – Бугского лимана и умеренный ветер различного направления существенно меняют процесс эволюции поверхностного загрязнения в Днепровско – Бугском лимане. Часть загрязнения может существенно снизить собственную скорость, попав в область с циркуляционным движением. Это, в свою очередь, приводит к тому, что часть загрязнения достигает побережья лимана. Смена направления ветра может привести к заметному смещению выделенной жидкости в поперечном направлении лимана. Другими словами, действие ветра существенно увеличивает площадь загрязнения акватории Днепровско – Бугского лимана.

Список литературы

1. Mee L. Between the Devil and the Deep Blue Sea : The coastal zone in an Era of globalization // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 2012. – Vol. 96. – P. 1 – 8.
2. Castaneda S., Juanes J. A., Medina R. Oil spill vulnerability assessment integrating physical, biological and socio-economical aspects : Application to the Cantabrian coast (Bay of Biscay, Spain) // *Journal of Environmental Management*. – 2009. – Vol. 91. – N. 1. – P. 149 – 159.
3. Pollani A., Triantafyllou G., Petihakis G. The Poseidon operational tools for the prediction of floating pollutant transport // *Marine Pollution Bulletin*. – 2001. – Vol. 43. – N. 7. – P. 270 – 278.
4. Berry A., Dabrowski T., Lyons K. The oil spill model OILTRANS and its application to the Celtic Sea // *Marine Pollution Bulletin*. – 2012. – Vol. 64. – N. 11. – P. 2489 – 2501.
5. Lehr W. J., Simecek-Beatty D. The relation of langmuir circulation process to the standard oil spill spreading, dispersion, and transport algorithms // *Spill Scien. Tech. Bull.* – 2000. – Vol. 6. – N. 3/4. – P. 247 – 253.
6. Carracedo P., Torres-Lopez S., Barreiro M. Improvement of pollutant drift forecast system applied to the Prestige oil spills in Galicia Coast (NW of Spain) : Development of an operational system // *Marine Pollution Bulletin*. – 2001. – Vol. 53. – N. 5. – P. 350 – 360.
7. De Dominis M., Bruciaferri D., Gerin R. A multi-model assessment of the impact of currents, waves and wind in modelling surface drifters and oil spill // *Deep-Sea Research : Topical Studies in Oceanography*. – 2016. – Vol. 133. – P. 21 – 38.
8. Mancho A. M., Small D., Wiggins S. A tutorial on dynamical systems concept applied to Lagrangian transport in oceanic flows defined as finite time data sets : Theoretical and computational issues // *Physics Reports*. – 2006. – Vol. 437. – N. 3. – P. 55 – 124.
9. Довгий С. О., Лифанов І. К. Метод сингулярних інтегральних рівнянь. Теорія та застосування. – К. : Наукова думка, 2004. – 510 с.
10. Гуржій А. А., Черний Д. І. Адаптований метод дискретних особливостей к задаче адвекції пасивної примеси морськими течіями // *Прикладна гідромеханіка*. – 2009. – Т. 11. – N. 2. – С. 30 – 39.
11. Kordas O., Gourjii A., Nikiforovich E., Cherniy D. A study on mathematical short-term modelling of environmental pollutant transport by sea currents : The Lagrangian approach // *Journal of Environmental Accounting and Management*. – 2017. – Vol. 5. – N. 2. – P. 87 – 104.
12. Вилля Г. Теорія вихреїв. – М., Л. : Гостехиздат, 1936. – 266с.
13. Миньковская Р. Я. Эволюция побережья морского устья рек Днепр и Южный Буг // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. – 2009. – N. 20. – С. 63 – 77.

References (transliterated)

1. Mee L. Between the Devil and the Deep Blue Sea: The coastal zone in an Era of globalization. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2012, vol. 96, pp. 1–8.
2. Castaneda S., Juanes J. A., Medina R. Oil spill vulnerability assessment integrating physical, biological and socio-economical aspects : Application to the Cantabrian coast (Bay of Biscay, Spain). *Journal of Environmental Management*. 2009, vol. 91, no. 1, pp. 149–159.
3. Pollani A., Triantafyllou G., Petihakis G. The Poseidon operational tools for the prediction of floating pollutant transport. *Marine Pollution Bulletin*. 2001, vol. 43, no. 7, pp. 270–278.
4. Berry A., Dabrowski T., Lyons K. The oil spill model OILTRANS and its application to the Celtic Sea. *Marine Pollution Bulletin*. 2012, vol. 64, no. 11, pp. 2489–2501.
5. Lehr W. J., Simecek-Beatty D. The relation of langmuir circulation process to the standard oil spill spreading, dispersion, and transport algorithms. *Spill Scien. Tech. Bull.* 2000, vol. 6, no. 3/4, pp. 247–253.
6. Carracedo P., Torres-Lopez S., Barreiro M. Improvement of pollutant drift forecast system applied to the Prestige oil spills in Galicia Coast (NW of Spain) : Development of an operational system. *Marine Pollution Bulletin*. 2001, vol. 53, no. 5, pp. 350–360.
7. De Dominis M., Bruciaferri D., Gerin R. A multi-model assessment of the impact of currents, waves and wind in modelling surface drifters and oil spill. *Deep-Sea Research : Topical Studies in Oceanography*. 2016, vol. 133, pp. 21–38.
8. Mancho A. M., Small D., Wiggins S. A tutorial on dynamical systems concept applied to Lagrangian transport in oceanic flows defined as finite time data sets : Theoretical and computational issues. *Physics Reports*. 2006, vol. 437, no. 3, pp. 55–124.
9. Dovguy S. O., Lifanov I. K. *Metod ssyngulyarnykh integral'nykh rivnyan'. Teoriya ta zastosuvannya* [Methods of singular integral equations. Theory and application]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 2004. 510 p.
10. Gourjii A. A., Cherniy D. I. Adaptirovannyi metod diskretnykh osobennostey k zadache adveksii pasivnoi primesy morskimy techeniyami [Method of discrete singularities adapted to the problem of passive admixture advection by sea currents]. *Pikladnaya gidromekhanika* [Applied hydromechanics]. 2009, vol. 11, no. 2, pp. 30–39.
11. Kordas O., Gourjii A., Nikiforovich E., Cherniy D. A study on mathematical short-term modelling of environmental pollutant transport by sea currents: The Lagrangian approach. *Journal of Environmental Accounting and Management*. 2017, vol. 5, no. 2, pp. 87–104.
12. Villya G. Teoria vihrey [Vortex theory]. – Moscow, Leningrad, Gostehizdat Publ., 1936. 266 p.
13. Minkovskaya R. Ya. Evolyutsiya poberezhya morskogo ustyia rek Dnepr i Yuzhny Bug [Evolution of the rivers Dnieper and Southern Bug sea estuary coast]. *Ekologicheskaya bezopasnost probrezhnoi i shelfovoi zon moray* [Ecological security of coastal and shelf sea zones]. 2009, no. 20, pp. 63–77.

Поступила (received) 27.03.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Гуржій Олександр Андрійович (Гуржій Александр Андреевич, Gourjii Alexandre Andreevich) – доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, професор, Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: (044) 406-83-30; e-mail: a.gourjii@gmail.com.

Кордас Ольга Ігорівна (Кордас Ольга Игоревна, Kordas Olga Igorivna) – кандидат технічних наук, доцент, Королівський технологічний інститут, м. Стокгольм; тел.: (+46040) 879-60-00; e-mail: olga@kth.se.

Никифорович Євген Іванович (Никифорович Евгений Иванович, Nikiforovich Eugene Ivanovich) – член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор, Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ; тел.: (044) 456-43-13; e-mail: eugnik@gmail.com.

Черній Дмитро Іванович (Черний Дмитрий Иванович, Cherniy Dmytro Ivanovich) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, м. Київ; тел.: (095) 830-72-87; e-mail: dmytro.cherniy@gmail.com.